



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2012

Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft

Haerberli, Wilfried ; Schleiss, Anton ; Linsbauer, Andreas ; Künzler, Andreas ; Bütler, Michael

Abstract: Mit fortschreitendem Temperaturanstieg und Gletscherschwund bilden sich in Hochgebirgen weltweit viele neue Seen. Modellrechnungen zeigen, dass sich die heute noch existierenden Gletscher-Landschaften der Schweizer Alpen bei realistischen Szenarien der Klimaentwicklung in den kommenden Jahrzehnten für wohl sehr lange Zeit zu Fels-Schutt-Seen-Landschaften mit stark erhöhter Abtragsdynamik verwandeln werden. Im Projekt NELAK (Neue Seen als Folge der Entgletscherung in den Alpen) des Nationalen Forschungsprogramms 61 «Nachhaltige Wassernutzung» werden Grundlagen für den Umgang mit dieser absehbaren Entwicklung erarbeitet. Von besonderem Interesse sind im Hinblick auf die anstehenden Neukonzessionierungen im Bereich der Wasserkraft dabei Synergiepotenziale von multifunktionalen Projekten für Energieproduktion, Sedimentrückhalt und Hochwasserschutz. Letzterer betrifft vor allem die langfristig ansteigende Wahrscheinlichkeit von grosskalibrigen Sturzereignissen in Seen unmittelbar unterhalb von zunehmend eisfrei werdenden Steiflanken mit tendenziell abnehmender Stabilität. Komplexe Rechtsfragen stehen an und eine frühzeitige Planung ist angezeigt.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-140414>

Journal Article

Published Version

Originally published at:

Haerberli, Wilfried; Schleiss, Anton; Linsbauer, Andreas; Künzler, Andreas; Bütler, Michael (2012). Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. *Wasser Energie Luft*, 104(2):93-102.

Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen

Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft

Wilfried Haeberli, Anton Schleiss, Andreas Linsbauer, Matthias Künzler, Michael Bütler

Zusammenfassung

Mit fortschreitendem Temperaturanstieg und Gletscherschwund bilden sich in Hochgebirgen weltweit viele neue Seen. Modellrechnungen zeigen, dass sich die heute noch existierenden Gletscher-Landschaften der Schweizer Alpen bei realistischen Szenarien der Klimaentwicklung in den kommenden Jahrzehnten für wohl sehr lange Zeit zu Fels-Schutt-Seen-Landschaften mit stark erhöhter Abtragsdynamik verwandeln werden. Im Projekt NELAK (Neue Seen als Folge der Entgletscherung in den Alpen) des Nationalen Forschungsprogramms 61 «Nachhaltige Wassernutzung» werden Grundlagen für den Umgang mit dieser absehbaren Entwicklung erarbeitet. Von besonderem Interesse sind im Hinblick auf die anstehenden Neukonzessionierungen im Bereich der Wasserkraft dabei Synergiepotenziale von multifunktionalen Projekten für Energieproduktion, Sedimentrückhalt und Hochwasserschutz. Letzterer betrifft vor allem die langfristig ansteigende Wahrscheinlichkeit von grosskalibrigen Sturzereignissen in Seen unmittelbar unterhalb von zunehmend eisfrei werdenden Steiflanken mit tendenziell abnehmender Stabilität. Komplexe Rechtsfragen stehen an und eine frühzeitige Planung ist angezeigt

des noch verbleibenden alpinen Eisvolumens bereits bis zur Jahrhundertmitte abschmelzen und auch grosse Gletscher in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts bis auf kleine Reste verschwinden dürften (z.B. Haeberli and Hoelzle 1995, Juvet et al., 2011, Huss, 2012). Das hochsommerliche Wasserangebot dürfte dadurch in kontinentaler Dimension beeinflusst werden (Huss, 2011).

Als Folge der Gletscherschmelze bilden sich neue Seen (Frey et al., 2010). Diese neuen Seen beschleunigen den Eiszerfall noch zusätzlich. Jüngste Beispiele aus der Schweiz sind der «Gletschersee» beim «Unterer Grindelwaldgletscher», der See am Triftgletscher, die neuen Seen auf dem Glacier de la Plaine Morte, im Vorfeld des Palü- und Gauligletschers (Bild 1) oder der gegenwärtig rasch wachsende See an der Zunge des Rhonegletschers. Als Folge des fortgesetzten Gletscherschwundes dürften innerhalb der nächsten Jahre und Jahrzehnte zahlreiche weitere neue Seen entstehen. Diese Seen stellen ein ernst zu nehmendes Gefahrenpotenzial dar (Künzler et al., 2010, Schaub et al., im Druck), eröffnen gleichzeitig aber auch neue Perspektiven für die Wasserkraft (Terrier et al., 2010) und den Tourismus (Müller et

1. Einleitung

Der Schwund der Gebirgsgletscher ist ein weltweites Phänomen (WGMS 2008) und scheint mit zunehmender Geschwindigkeit abzulaufen (WGMS 2011). Dies ist primär eine Folge des globalen Temperaturanstiegs, der wiederum immer stärker durch Einflüsse des Menschen (v.a. Treibhausgase) auf den Strahlungshaushalt der Erde gesteuert wird. Nach den neuesten Hochrechnungen (Haeberli et al., im Druck; Paul

et al., im Druck) verlieren die Gletscher der Alpen gegenwärtig (2011) im Mittel jährlich etwa 40 km² ihrer Fläche von noch rund 1800 km² und etwa 2 km³ ihres Volumens von noch rund 80 ± 20 km³. Die Intensität der Schmelzprozesse führt dabei zunehmend zu Zerfallserscheinungen des Eises. Modellrechnungen verschiedener Komplexität für realistische Szenarien weiterer Erwärmung ergeben seit vielen Jahren übereinstimmend, dass wesentliche Teile

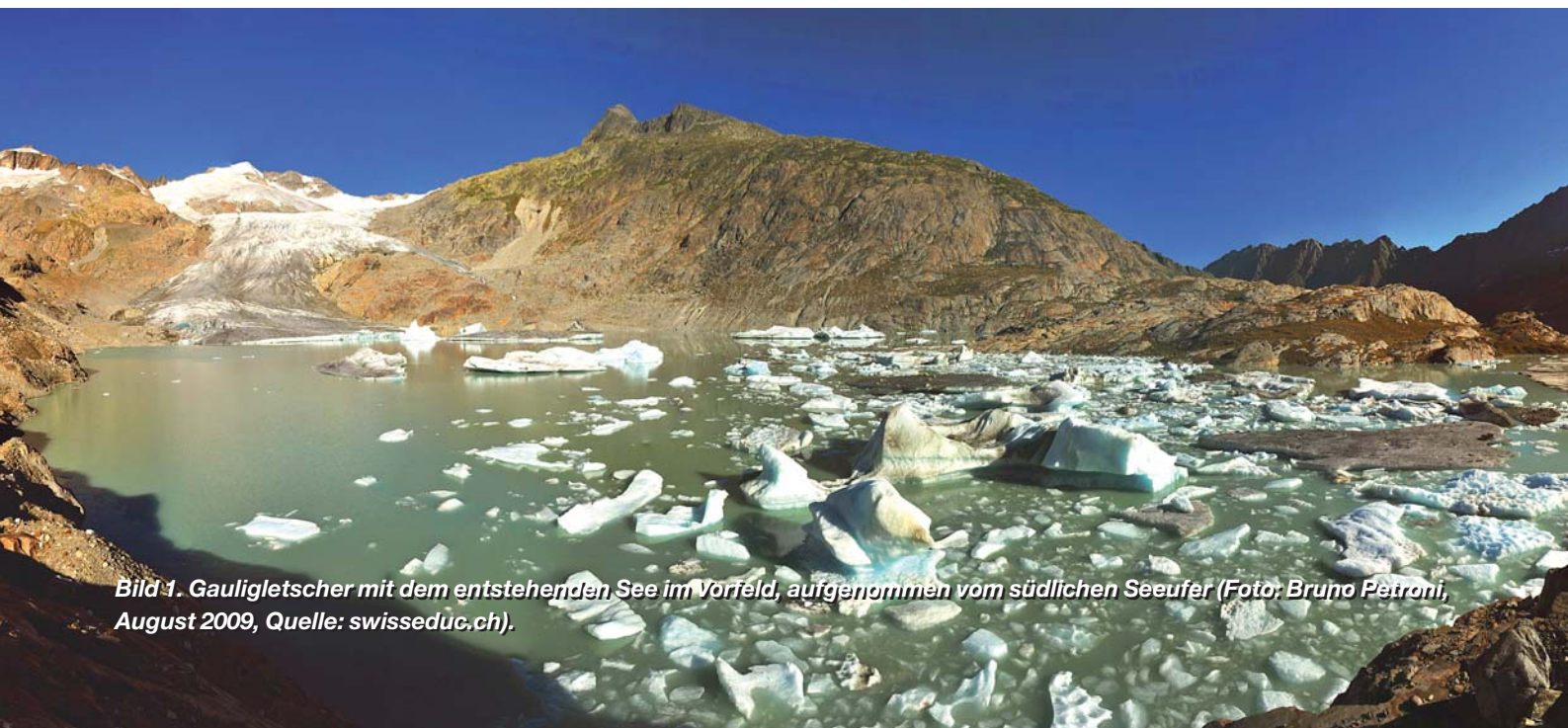


Bild 1. Gauligletscher mit dem entstehenden See im Vorfeld, aufgenommen vom südlichen Seeufer (Foto: Bruno Petroni, August 2009, Quelle: swisseduc.ch).

al., im Druck), wobei komplexe Rechtsfragen entstehen. Das Projekt NELAK¹ (New lakes in deglaciating high-mountain areas: climate-related development and challenges for sustainable use) des Nationalen Forschungsprogramms 61 «Nachhaltige Wassernutzung» erarbeitet in interdisziplinärer Zusammenarbeit und in engem Kontakt mit Institutionen der Politik, der Privatwirtschaft und betroffener NGOs eine entsprechende Wissensbasis als Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Planung. Der Gesamtbericht soll im Jahr 2012 publiziert werden. Im vorliegenden Artikel werden zentrale Aspekte der Naturgefahren und der Wasserkraft herausgegriffen. Die gemeinsame Betrachtung dieser beiden Aspekte zeigt die Vorteile der im Projekt NELAK angestrebten inte-

gralen Analyse, hier speziell im Hinblick auf Möglichkeiten der Kombination von Hochwasserschutz und Wasserkraft. Wesentliche Vorarbeiten wurden bereits im Rahmen der Projekte «Klimaänderung und Wasserkraft» (vgl. Beiträge in WEL 4-2011) sowie «Klimaänderung und Hydrologie» (CCHydro)² geleistet.

2. Neue Seen

Digitale Geländemodelle ermöglichten es in den letzten Jahren, Eisdicken für Gebirgsgletscher detailliert zu berechnen. Im Prinzip basieren die verwendeten Ansätze auf einer vereinfachten Inversion des Eisfließgesetzes (Spannung als Funktion von Massenumsatz und Fließen). Dabei werden die über Oberflächenprozesse geschätzten Massenflüsse (Farinotti et al.

2009) oder empirischen Schubspannungswerte als Funktion des durch die Höherenstreckung des Gletschers beeinflussten Massenumsatzes verwendet (Linsbauer et al., 2009). Weil die Komponenten des Gletscherfließens (Eisdeformation und basales Gleiten) nicht realistisch quantifiziert werden können, sind die absoluten Werte der so geschätzten Eisdicken mit Unsicherheiten von rund $\pm 20\text{--}30\%$ behaftet. Die daraus berechneten räumlichen Muster von Eisdicken und entsprechenden Gletscherbett-Topographien sind jedoch primär über die basalen Schubspannungen mit der in den Geländemodellen enthaltenen Oberflächenneigung verknüpft und daher robust. Mit dem GIS-basierten Ansatz von Linsbauer et al. (2009) wurde ein digitales Geländemodell der gesamten Schweizer Alpen «ohne Gletscher» erstellt. Dieses Geländemodell enthält im Bereich der heutigen Gletscherbetten 500–600 geschlossene Depressionen oder «Übertiefungen» mit einer Gesamtfläche von rund 50–60 km², in denen sich in absehbarer Zukunft Seen bilden könnten (Bild 2). Die grössten Durchschnittstiefen solcher potenzieller Seen liegen bei 100 m, die meisten potenziellen Seen sind jedoch im Schnitt weniger als 50 m tief. Rund ein Drittel aller Übertiefungen weist ein Volumen von über 1 Mio m³ auf, etwa 40 haben ein Volumen von über 10 Mio m³ und potenzielle Seen mit Volumen über 50 Mio m³ sind bei den Gletschern Aletsch, Gorner, Otemma, Corbassière, Gauli und Plaine Morte zu erwarten. Im verkarsteten Gebiet der Plaine Morte ist eine langfristige Seebildung fraglich. Das Gesamtvolumen der potenziellen Seen beträgt etwa 2 km³ oder rund 3% des heutigen Gletschervolumens der Schweiz. Die entsprechende Wassermenge liegt in der gleichen Größenordnung wie ein jähr-

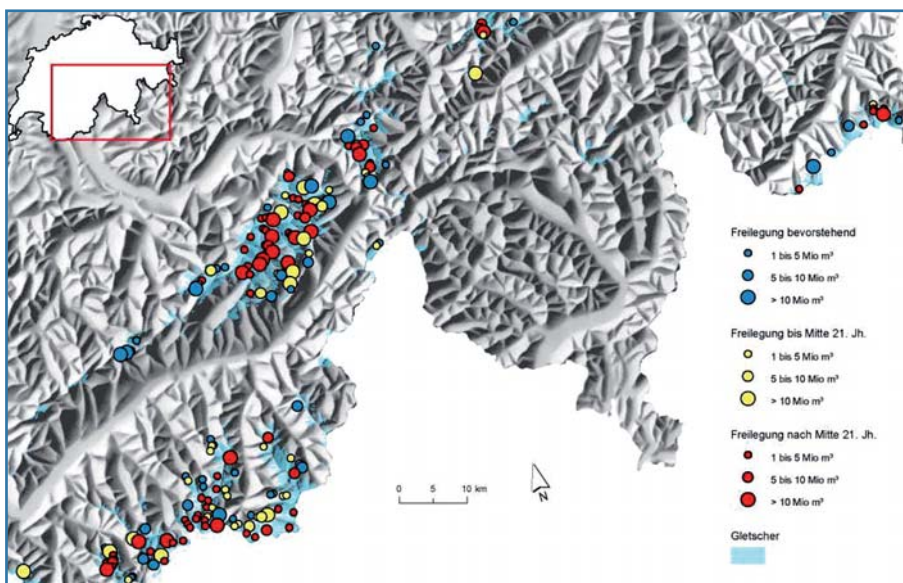


Bild 2. Modellerte Übertiefungen (~ potenzielle Seen) in den heute eisbedeckten Gletscherbetten der Schweiz. Die Übertiefungen sind klassifiziert nach ihrem Volumen (Kreisgrösse) und dem erwarteten Zeitpunkt ihrer Freilegung (Kreisfarbe). Übertiefungen mit einem Volumen < 1 Mio m³ sind nicht dargestellt. Modell und Berechnung: Linsbauer et al. (2009). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).



Bild 3a, links. Kavernenbildung infolge subglazialer Ablation durch einen Schmelzwasserbach am Gletscherbett unter der Zunge des Morteratschgletschers. (Foto: Jürg Alean, Februar 2009, Quelle: swisseduc.ch). Bild 3b, rechts. Kollaps-Erscheinung am Steingletscher (Foto: Esther Peguiron, Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, September 2004).

licher Gletscherabfluss bei heute typisch negativer Massenbilanz (Eisdickenverlust) von rund 1 m/Jahr. Offen bleiben die Fragen, ob allenfalls schluchtartige Entwässerungsrinnen vorhanden sind und wie schnell vor allem seichte Seen mit Sedimenten gefüllt würden. Das Modellresultat entspricht in diesem Sinn wohl eher einer Maximalvariante der möglicherweise entstehenden Seen. Am Gletscherrand modellierte Seen müssen mit besonderer Vorsicht interpretiert werden, da es dort wegen der problematischen Neigungsbestimmung zu Modellartefakten kommen kann (Paul und Linsbauer, 2012).

Die zur Verfügung stehende Planungszeit bis zur allfälligen Entstehung der neuen Seen muss mit plausiblen Szenarien des Gletscherschwundes abgeschätzt werden. Damit verbunden ist eine ganze Kette von Unsicherheiten hinsichtlich der natürlichen Klimaschwankungen, der zukünftigen Treibhausgas-Emissionen, der Reaktion des Klimas auf veränderte Treibhausgaskonzentrationen und der Reaktion der Gletscher auf sich verändernde Klimabedingungen. Vereinfacht werden oft Temperatureffekte für die Entwicklung der Gletschermasse betrachtet (z.B. Oerlemans, 2001, 2005). Da die Lufttemperatur tatsächlich alle Faktoren der Energie- und Massenbilanz – über die Schnee-/Regengrenze auch die Akkumulation – beeinflusst (Ohmura, 2001), liefern solche Näherungen erster Ordnung bereits entscheidende Information. Bei einem Temperaturanstieg von mehreren °C spielen beispielsweise Veränderungen des Niederschlags nur noch eine untergeordnete Rolle (Zemp et al., 2006). Neben der Frage nach der anzunehmenden Klimaentwicklung sind bei langfristigen Abschätzungen des Gletscherschwundes Unsicherheiten der berechneten Gletscherszenarien primär durch Schwierigkeiten der Parametrisierung – vor allem der nur grob geschätzten Eisdicke, der Akkumulation von Schnee und der Veränderung der Albedo – gegeben. Die durch Staubeintrag seit 2003 eingetretene massive Reduktion der Albedo an den Oberflächen der Alpengletscher (Paul et al., 2005; Oerlemans et al., 2009) dürfte nachhaltig sein und die Energiebilanz gegenüber früheren Bedingungen für viele Jahre wenn nicht Jahrzehnte stark verändern. Weitere selbstverstärkende Rückkoppelungsprozesse werden beobachtet (Paul et al., 2007): die neuen Seen selber können infolge ihrer niedrigen Albedo und ihrer Fähigkeit zur Erwärmung über 0 °C mit effizienten Zirkulationsprozessen und Kalbungsvorgängen am Eisrand die

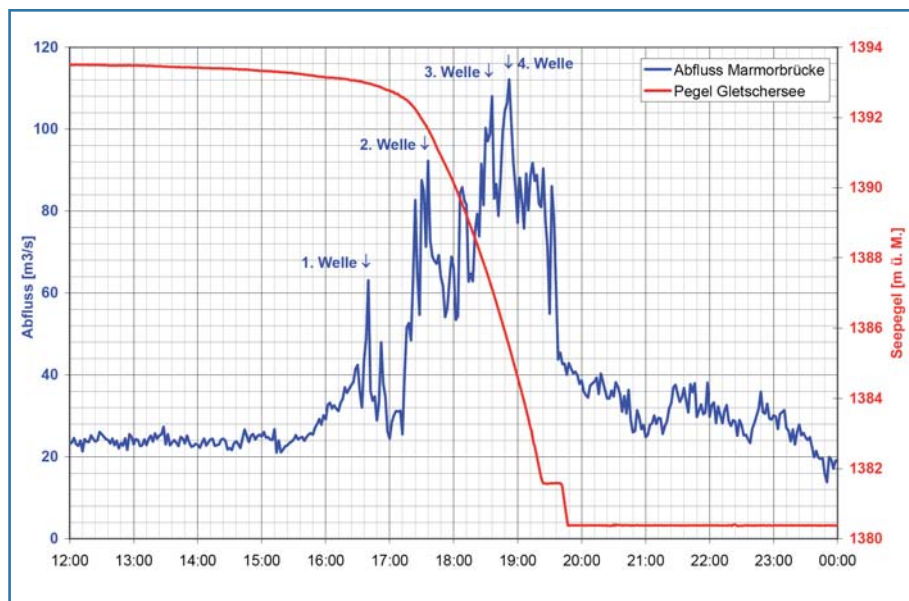


Bild 4. Abflusskurve beim Ausbruch des temporären Gletschersees am Unteren Grindelwaldgletscher vom 30. Mai 2008. Die progressive Erweiterung des Abflusskanals im Eis-/Felstrümmerdamm ist mit mehreren plötzlichen Durchbrüchen nach vorübergehendem Rückstau kombiniert. (Diagramm: Nils Hählen, Oberingenieurkreis I Kanton Bern, 2008).

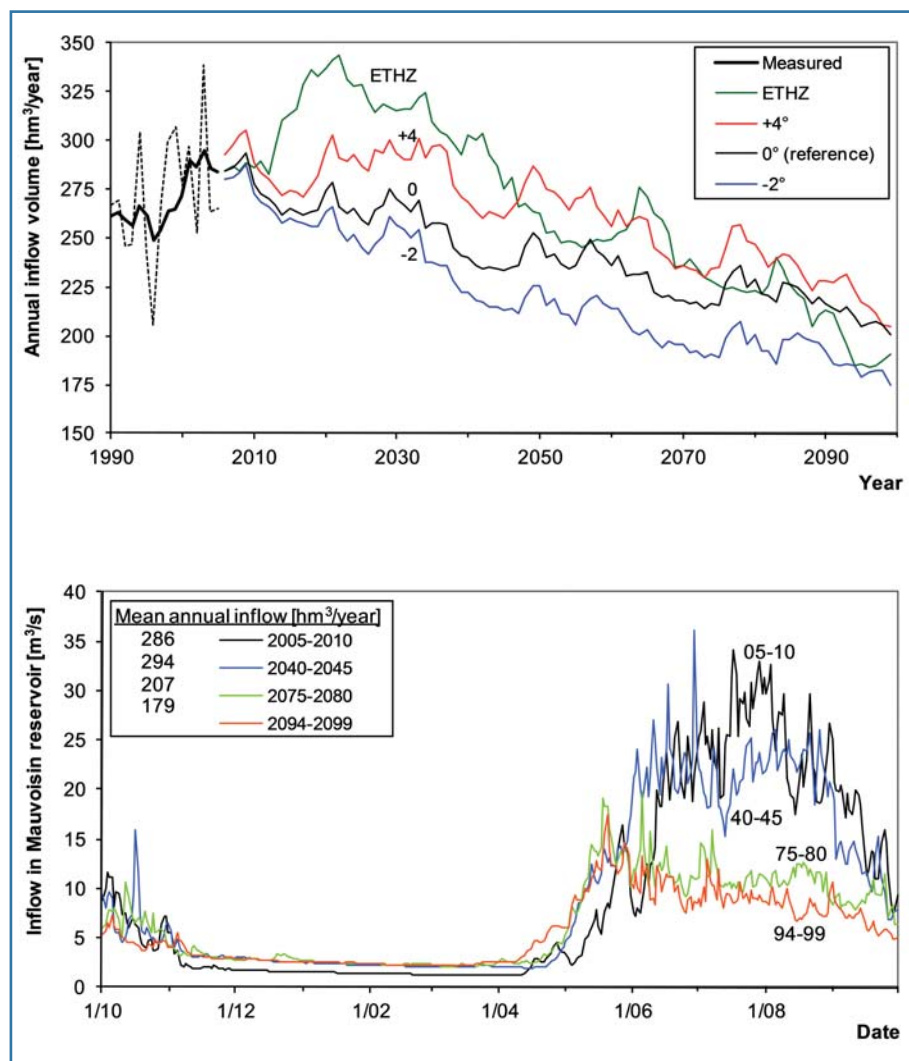


Bild 5a, oben. Jährliches Zuflussvolumen in den Mauvoisin-Stausee (gemittelt über fünf Jahre) gemäss verschiedenen Klimaszenarien.

Bild 5b, unten. Hydraulisches Regime des Mauvoisin-Zuflusses (gemittelt über fünf Jahre) für das Szenario ETHZ.

Schwundprozesse drastisch beschleunigen. Wenn der Dickenschwund der Gletscher schneller ist als die Längenänderung durch den Rückzug der Zunge, verstärken sich subglaziale Schmelzprozesse durch Kavernenbildung (*Bild 3a*) und Eindringen von Warmluft im Sommer, was zu beschleunigendem Einsinken der Oberfläche und zu Kollaps-Erscheinungen (*Bild 3b*) des Eises führen kann. Entgegengesetzt – also den Eisschwund verlangsamend – wirkt die bei abnehmender Gletscherfläche und eisfrei werdenden Felsflanken tendenziell zunehmende Schuttbedeckung. Mit dem Absinken der Gletscheroberfläche erhöht sich einerseits die Lufttemperatur und damit der Schmelzvorgang an der Gletscheroberfläche, andererseits kann sich aber auch der Schattenwurf umliegender Berge verstärken. Die Summe der Effekte muss für jeden Gletscher individuell betrachtet werden, wirkt sich aber insgesamt wohl deutlich beschleunigend auf den Eisschwund aus. Effekte verzögerter Reaktion hängen primär mit der latenten Energie des Eises zusammen und spielen bei grossen Gletschern und relativ kurzen Zeitintervallen (wenige Jahrzehnte) eine Rolle.

In Anbetracht der mit den Szenarien des Gletscherschwundes verbundenen Unsicherheiten wird der Zeitraum der neu entstehenden Seen nicht in Jahreszahlen sondern in Worten ausgedrückt, nämlich «bevorstehend», «in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts» und «nach der Jahrhundertmitte». Ausschlaggebend sind dabei die maximalen und minimalen Schwundraten aus den oben geschilderten Modellansätzen. Aus *Bild 2* wird deutlich, dass ein wesentlicher Teil der neuen Seen bereits in den kommenden Jahrzehnten entstehen dürfte.

3. Das Gefahrenpotenzial neuer Seen

Mit fortgesetztem Gletscherrückgang bilden sich die neuen Seen mehr und mehr am Fuss von extrem steilen und oft vereisten Bergflanken. Die Stabilität dieser Steiflanken nimmt mit dem Eisschwund langfristig ab, was zu grosskalibrigen Sturzereignissen mit weit reichender Schwall- und Flutwellenbildung in Seen führen kann (Haeberli and Hohmann, 2008). Die Wahrscheinlichkeit solch potenzieller Katastrophen mag derzeit noch klein erscheinen,

nimmt aber mit wachsender Anzahl neuer Seen und weiter schwindendem Eis zu. Vor allem wird diese Gefahr voraussichtlich für viele Jahrzehnte, wenn nicht sogar Jahrhunderte andauern. Man kann die neuen Seen deshalb nicht einfach sich selber überlassen. Die Gefahr von vermehrten Bergstürzen und Seeausbrüchen wie auch die Möglichkeit des Hochwasserschutzes durch Retentions-Massnahmen müssen insbesondere auch im Zusammenhang mit dem weiteren Betrieb oder Ausbau von Kraftwerken im Hochgebirge berücksichtigt werden.

Flutwellen und Murgänge als Folge von Seeausbrüchen im Hochgebirge können über grosse Distanzen schwere Schäden anrichten. Hochwasserabflüsse aus entsprechenden Grossereignissen können dabei das Ausmass von Niederschlags-hochwassern bei weitem übersteigen und den Charakter von Flutwellen und Murgängen nach Dammbrüchen annehmen, wie sie im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen für künstliche Stauseen in Betracht gezogen werden. Da der Alpenraum einem grossen Siedlungsdruck unterworfen ist, befinden sich Bevölkerung und Infrastruktur oft unweit potenziell gefährlicher Seen. Um entsprechende Gefahrenpotenziale und Risiken abzuschätzen, müssen komplexe Situationen und Prozessketten für Bedingungen weit jenseits des historischen Erfahrungsbereiches in integrativer Art erfasst und nach Möglichkeit quantitativ modelliert werden. In der Schweiz ist zu dieser Problematik eine international anerkannte Wissensbasis erarbeitet worden. Neuere Übersichten dazu geben Haeberli et al. (2007, 2010), Huggel et al. (2004) oder Käab et al. (2005a, b). Zeitlich rückwärts orientierte und einseitig auf Gletscher eingeeengte Konzepte (Raymond et al., 2003) sind hier nicht zielführend.

Ausbrüche von Hochgebirgsseen können durch verschiedene Kombinationen von Dispositions- und Auslöseprozessen verursacht werden (Haeberli, 2010). Seen mit massiven Gletscherdämmen brechen «hydraulisch» durch Anhebung der Eisbarriere und progressive Erweiterung von Kanälen im oder unter dem Eis aus. Bei Eistrümmerdämmen von Eislawinen kann es auch zu «mechanischem» Bruch mit plötzlichen und besonders hohen Abfluss-Spitzen kommen. Kombinationen der beiden Ausbruchsarten sind ebenfalls möglich (*Bild 4*). Breschenbildung und rasche Entleerung von moränengestauten Seen kann durch progressiven Grundwasserfluss (piping), rückschreitende Erosion am Überlauf oder instabile Steilböschungen der

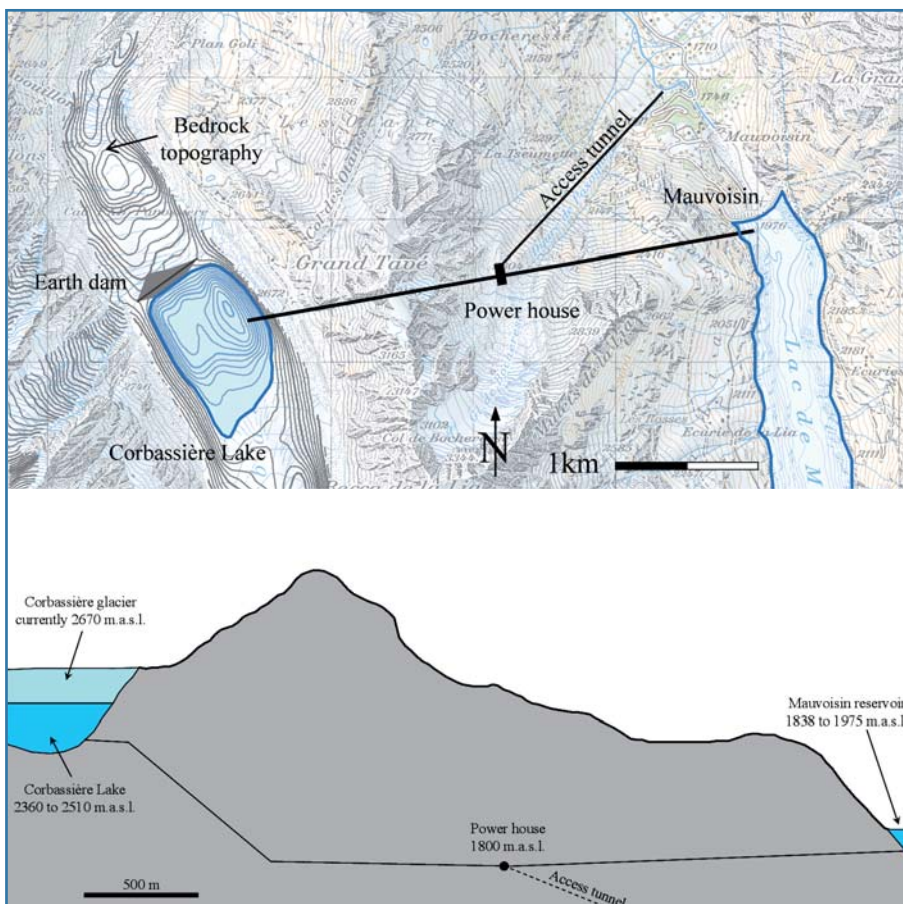


Bild 6a, oben. Übersichtskarte des potenziellen neuen Stausee im Vorfeld des Glacier du Corbassière mit dem möglichen Pumpspeicherwerk zur Verbindung mit dem Stausee Mauvoisin. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).

Bild 6b, unten. Profil entlang des möglichen Pumpspeicherwerkes zwischen Glacier du Corbassière und Stausee Mauvoisin.

Dammflanken ausgelöst werden, wobei all diese Phänome bei hohem Wasserspiegel zusammenspielen können. Grundsätzlich können alle Seen innerhalb der Reichweite von Eis-, Fels- und Bergstürzen oder Moräneninstabilitäten als Folge entsprechender Impulse überschwappen oder sogar ganz ausgepresst werden. Prozesse der Hang-Destabilisierung sind mit Erwärmungstendenzen verbunden (a) über die Spannungsverteilung nach abnehmender Stützwirkung durch Gletscher (z.B. Sturz in der Eiger-Ostflanke nach massivem Gletscherschwund) und (b) über die Erwärmung, den Eisverlust und die zunehmende Durchlässigkeit für Wasser des wärmer werdenden Permafrostes. In letzter Zeit scheinen sich im Permafrost-Bereich des Hochgebirges grosse Sturz-Ereignisse mit Volumina über 10^5 bis 10^6 m³ zu häufen (Fischer et al., 2012). Das jüngste Ereignis wurde am Pizzo Cengalo³, Bergell, am 27. Dezember 2011 beobachtet und hatte ein Volumen von 2–3 Millionen m³, das durchaus vergleichbar ist mit dem Volumen vieler neu entstehender Seen. Neben der geologischen Beschaffenheit und der Neigung ist der Eisschwund nur *ein* Einfluss in der für längerfristige Hanginstabilitäten im Hochgebirge massgeblichen Faktorenkombination. Er ist jedoch derjenige Faktor, der sich zurzeit am schnellsten und massivsten ändert. Eine Abschätzung des Gefahrenpotenzials durch einen grossvolumigen Sturz muss versuchen, kritische Faktorenkombinationen zu definieren. Eine rasch zunehmende wissenschaftliche Literatur liefert dazu wichtige Grundlagen (Davies et al., 2001; Fischer et al., 2010;

Gruber and Haeberli, 2007; Haeberli et al., 1997; Harris et al., 2009; Huggel, 2009). Die komplexen thermischen Bedingungen hochalpiner Gipfel können in entsprechenden Rechenmodellen der Wärmediffusion in ihren wesentlichen Zügen simuliert werden (Noetzli and Gruber, 2009) und mögliche Sturzbahnen können mit Modellrechnungen abgeschätzt werden (Noetzli et al., 2006; Romstad et al., 2009, Schneider, 2011). Auf internationaler Ebene definierte der International Working Group on Glacier and Permafrost Hazards⁴ (GA-PHAZ) der International Association of Cryospheric Sciences (IACS/IUGG) und der International Permafrost Association (IPA) grundsätzliche Prinzipien und Standards bei der Behandlung solcher Probleme.

Mögliche Ausbruchsmechanismen und entsprechende Schadenpotenziale sind Veränderungen in der Zeit unterworfen. Von den grossen Moränen der kühleren nacheiszeitlichen Perioden haben sich die rasch reagierenden Alpengletscher bereits zurückgezogen. Brüche von Moränendämmen stehen deshalb weniger im Vordergrund der Betrachtung. Eisdämme können bei Seen lokal bedeutend sein, die sich an Gletscheroberflächen bilden: z.B. Grindelwald (Werder et al., 2010), der Lago Effimero am Ghiacciaio del Belvedere, Macugnaga/Italien (Kääb et al., 2004), der Lac de Rochemelon in Frankreich (Vincent et al., 2010), oder die neuen Seen auf der Plaine Morte. Sie dürften wegen des generellen Gletscherschwundes in den kommenden Jahrzehnten jedoch eine sukzessiv kleiner werdende Rolle spielen. Auf die Dauer ist das grösste und am wei-

testen reichende Schadenpotenzial wohl mit grossen Stürzen in Seen am Fuss von Steiflanken verbunden.

Für die Gefahrenprävention steht in der Schweiz bereits heute eine ganze Palette möglicher Massnahmen zur Verfügung (vgl. Berichte der Nationalen Plattform Naturgefahren PLANAT⁵). Diese Palette reicht von der visuellen Beobachtung bis zur instrumentierten Überwachung/Frühwarnung, vom passiven Schutz durch Freihalten von gefährdeten Zonen oder kurzfristiger Evakuierung bis zu baulichen Eingriffen (Überflutungsschutz, Retention). Retentionsmöglichkeiten als langfristige Schutzmassnahme sind im Zusammenhang mit dem Kraftwerksbetrieb besonders interessant.

4. Wasserkraft

Die Wasserkraft ist der Hauptpfeiler der schweizerischen Elektrizitätsversorgung und wird auch in Zukunft die wichtigste und effizienteste erneuerbare Energie in der Schweiz bleiben. Mit dem Rückzug der Gletscher verändern sich die Zuflüsse zu den Stauseen. Seit etwa 30–40 Jahren sind die Zuflüsse zu den Stauseen angewachsen. Dieser Trend wird dank der Gletscherschmelze je nach Klimaszenarien in den nächsten 10 bis 30 Jahren anhalten. Anschliessend werden die Zuflüsse mit dem fortschreitenden Verschwinden der Gletscher stark und längerfristig irreversibel abnehmen (Bild 5). Die dabei neu entstehenden Seen, welche höher als die bestehenden Stauseen liegen, könnten mit-helfen, die heutige Stromproduktion aus Wasserkraft aufrecht zu erhalten. Durch den Bau von neuen Talsperren kann das Volumen dieser natürlichen Seen vergrössert werden und zur Produktion von Spitzenenergie aber auch zu Pumpspeicherung von temporär überschüssiger Wind- und Sonnenenergie verwendet werden. Die Speicherfunktion der bestehenden und zukünftigen Stauseen ist für den Wasserhaushalt in der Schweiz von grösster Bedeutung, da diese nach dem Abschmelzen der Gletscher deren Speicherfunktion übernehmen müssen. Neben der sicheren Stromversorgung werden die Stauseen zukünftig vermehrt zur Anreicherung der Gewässer in lang andauernden Trockenperioden sowie zum Hochwasserschutz beitragen müssen. Die Gefahr von unkontrollierten Ausbrüchen sowie das Überschwappen bei Felsstürzen und Erdbeben in diese neu entstandenen Gletscherseen kann mit dem Bau von Talsperren reduziert werden, welche kontrollierte Überläufe sowie genügend Freibord

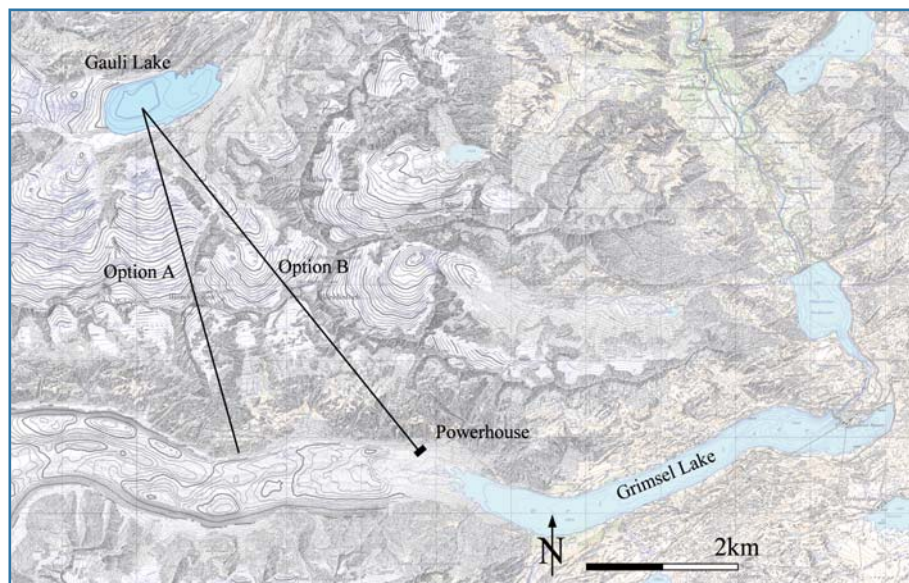


Bild 7. Übersichtskarte des potenziellen neuen Stausees im Vorfeld des Gauligletschers mit dem möglichen Speicherkraftwerk zur Verbindung mit dem Grimselsee (Option B) oder der möglichen Überleitung des Wassers (Option A) in den Grimselsee. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).

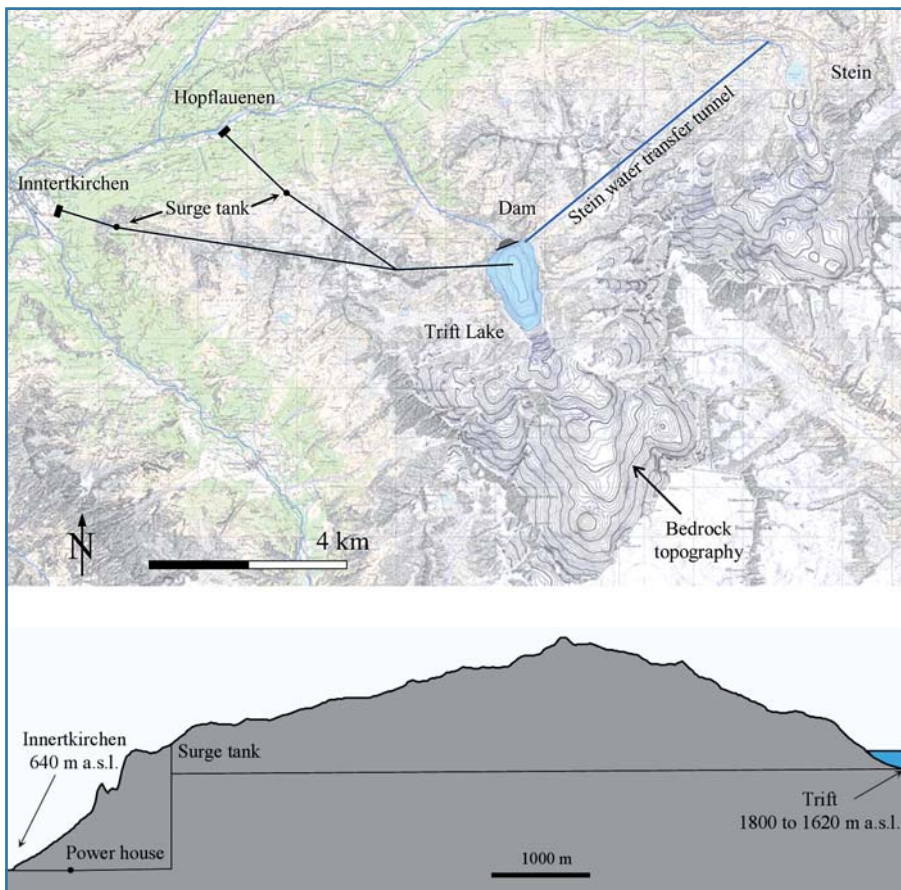


Bild 8a, oben. Übersichtskarte des aufgestauten Triftsees mit dem möglichen Speicherkraftwerk. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).

Bild 8b, unten. Profil entlang des möglichen Speicherkraftwerkes zwischen Triftsee und Innertkirchen.



Bild 9. Blick auf den «Unteren Grindelwaldgletscher» mit dem Fiescherhorn im Hintergrund (Foto: Wilfried Haeberli, 2009).

gegen Impulswellen haben. In diesem Sinne können neue Stauseen mit Vorteil Mehrzweck- und Synergieprojekte sein. Nicht zuletzt müssen die neuen Stauseen so konzipiert sein, dass sie auch die verstärkte Sedimentzufuhr nach Abschmelzen der Gletscher mit entsprechenden Spülvorrichtungen beherrschen können.

An zwei Fallstudien wurde das energiewirtschaftliche Potenzial der neuen Gletscherseen untersucht. Dabei wurden die Einzugsgebiete mit allen bestehenden und zukünftigen Anlagen in einem hydrologisch-hydraulischen Abflussmodell (Routing System 3.0) nachgebildet. Nach einer Eichung mit Messungen der Abflüsse und der Gletscherentwicklung für die letzten rund 30 Jahre wurden vier verschiedene Klimaszenarien simuliert. Für die Energieproduktion wurde ein spezielles Simulationsmodul entwickelt, welches basierend auf den Spotmarktpreisen (EEX) die Stromproduktion unter bestimmten Randbedingungen wie Speicherinhaltsentwicklung wirtschaftlich optimiert. Sich selbst verstärkende Rückkoppelungseffekte wie etwa die in jüngsten Jahren eingetretene Albedo-Reduktion der Gletscheroberflächen oder die zunehmende subglaziale Ablation sind noch nicht berücksichtigt. Der Gletscherschwund könnte in Wirklichkeit deshalb auch dramatischer ausfallen.

Im Fallbeispiel Mauvoisin hat sich gezeigt, dass ein neuer See «Corbassière» mit einer relativ kleinen Staumauer zu einem bedeutenden Speicher von rund 50 Mio m³ Inhalt aufgestaut werden könnte. Neben der zusätzlichen Saisonspeicherung kann die Gefällsstufe von durchschnittlich 600 m für ein Pumpspeicherkraftwerk von 500 MW genutzt werden (Bild 6). Dieses Pumpspeicherkraftwerk Mauvoisin-Corbassière wäre bereits bei den heutigen Strompreisen wirtschaftlich und würde die bestehenden Anlagen energiewirtschaftlich erheblich aufwerten.

Beim Kraftwerkskomplex Oberhasli (KWO) geht es um zwei neue Seen bei den Gletschern Gauli und Trift. Der Gauli-see müsste mit einer kleinen Mauer gesichert werden. Das Wasser könnte direkt mit einem neuen Kraftwerk in den bestehenden Grimselstausee turbinieren werden (Bild 7). Beim neuen Triftsee erweist sich als wirtschaftlichstes Projekt der Bau einer 110 m hohen Talsperre mit einem Stausee von 105 Mio m³ Inhalt. Das Wasser könnte zur Erzeugung von Spitzenenergie in einer neuen Zentrale bei Innertkirchen turbinieren werden (Bild 8). Mit einer Beileitung des Wassers aus dem Steingletscher könnte der Zufluss zum neuen Triftsee noch er-

höht werden. Die beiden Anlagen könnten die regulierbare Leistung bei den KWO um insgesamt 500 MW erhöhen. Sie würden auch die Energiewirtschaftlichkeit der heutigen Anlagen sowie diejenigen des geplanten Ausbaues KWO plus verbessern.

5. Rechtliche Fragen

Die mit Gletscherseen verbundenen Gefahren (Flutwellen, Hochwasser, Murgänge) werfen die Frage auf, wer für Schutzmassnahmen zugunsten von Bevölkerung, Siedlungen und Infrastrukturen verantwortlich ist. Die Rechtsgrundlagen zu den Naturgefahren sind uneinheitlich und zersplittert. Massgebend ist vorliegend die Wasserbau- und Waldgesetzgebung. Nicht ausdrücklich gesetzlich verankert ist das heute angewendete integrale Risikomanagement (Prävention, Intervention, Wiederinstandstellung). Prioritär sind raumplanerische, sekundär bauliche Massnahmen. Die zuständigen Behörden haben Ereigniskataster und Gefahrenkarten zu erstellen, nach Objektkategorien abgestufte Schutzziele zu definieren sowie Mess- und Frühwarnsysteme einzurichten. Entsprechende Erkenntnisse sind in der Richt- und Nutzungsplanung von Kantonen und Gemeinden zu berücksichtigen. Dies geschieht mittels verschiedener Gefahrenzonen (Verbots-, Gebots- und Hinweiszone) und Vorschriften in den Bau- und Zonenreglementen. Um vorhandene Hochwassergefahren zu reduzieren, müssen die Gewässerräume ausgeweitet, Abflusskorridore freigehalten und Rückhalteräume geschaffen werden. Je nach Umständen dürfen lokal keine Bauzonen ausgeschieden werden, sind Rück- oder Auszonungen vorzunehmen bzw. Nutzungsbeschränkungen oder Auflagen zu verfügen. Bauliche Schutzmassnahmen setzen voraus, dass deren Errichtung für die Behörden zumutbar ist und dass ökologische Anforderungen eingehalten werden.

Den Betreibern von Stauanlagen obliegen speziell geregelte Sorgfaltspflichten. Die offiziellen Kategorien von Wanderwegen sind so anzulegen und zu unterhalten, dass Wandernde vor überraschenden, fallenartigen Gefahren geschützt sind. Schutzmassnahmen müssen zumutbar sein. Sie können nur verlangt werden, wenn die Gefahr den verantwortlichen Behörden und Organisationen bekannt war bzw. sein musste. Die Eigenverantwortung spielt gerade auf Wanderwegen eine wichtige Rolle.

Ereignen sich im Zusammenhang mit Gletscherseen Unfälle oder Schäd-

den, kann die geschädigte Person den finanziellen Schaden zivilrechtlich evtl. auf eine haftpflichtige Person bzw. Behörde überwälzen. Dazu müssen die Voraussetzungen spezieller Haftungsnormen (z.B. allgemeine Verschuldenshaftung, Haftung des Werkeigentümers bei Werkmängeln, Vertragshaftung oder Staatshaftung) erfüllt sein. Auch pflichtwidriges Untätigbleiben (Unterlassung) vermag beim Vorliegen einer Rechtspflicht (Garantenstellung) haftungsrechtliche Konsequenzen auszulösen. Ein allfälliges Selbstverschulden des Geschädigten führt mindestens zu einer Reduktion des Schadenersatzes. Verletzungen der Sorgfaltspflicht können auch strafrechtliche Sanktionen (z.B. Busse, Freiheitsstrafe) nach sich ziehen.

Werden im Bereich von Gletscherseen bauliche Massnahmen zum Schutz

vor Gefahren, zur Stromproduktion oder für den Tourismus geplant, sind Interessenkonflikte zwischen Nutzung und Schutz zu beachten. Vorgängig ist eine eingehende Analyse der tatsächlichen und rechtlichen Voraussetzungen zu empfehlen, um Probleme und mögliche Konflikte rechtzeitig zu erkennen bzw. zu verkleinern. In rechtlicher Hinsicht sind die gesetzlichen Vorgaben der Raumplanung, des Natur- und Heimatschutzes, des Gewässer- und Umweltschutzes, des Wasser- und Transportrechts massgeblich. Für grosse Bauvorhaben mit überörtlicher Bedeutung besteht eine Planungspflicht (auf Ebene Richtplanung bzw. Nutzungsplanung). Kleinere Bauprojekte ausserhalb der Bauzonen erfordern eine Ausnahmegewilligung, welche Standortgebundenheit und eine umfassende Interessenabwägung bedingt.

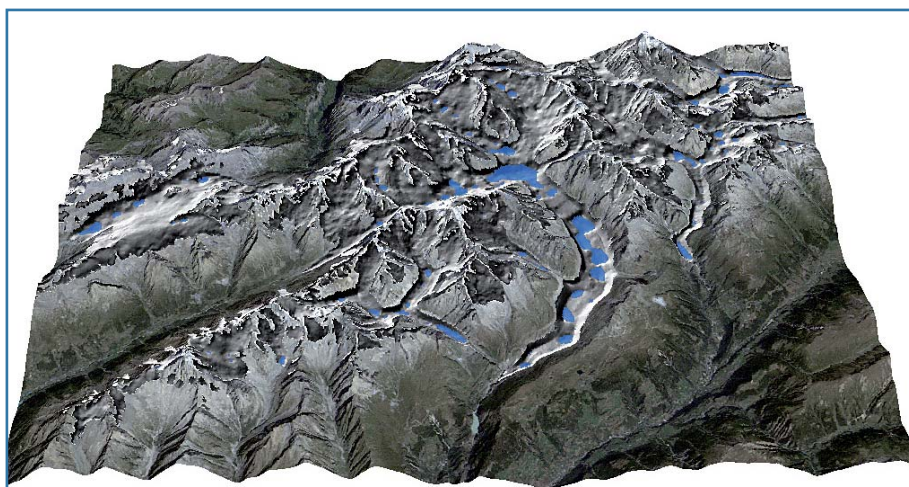


Bild 10. Überblick über die Region um den Aletschgletscher. Dargestellt sind die modellierten Gletscherbetten (die Gletscher vollständig entfernt) mit den darin detektierten Übertiefungen (potenzielle zukünftige Seen). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).

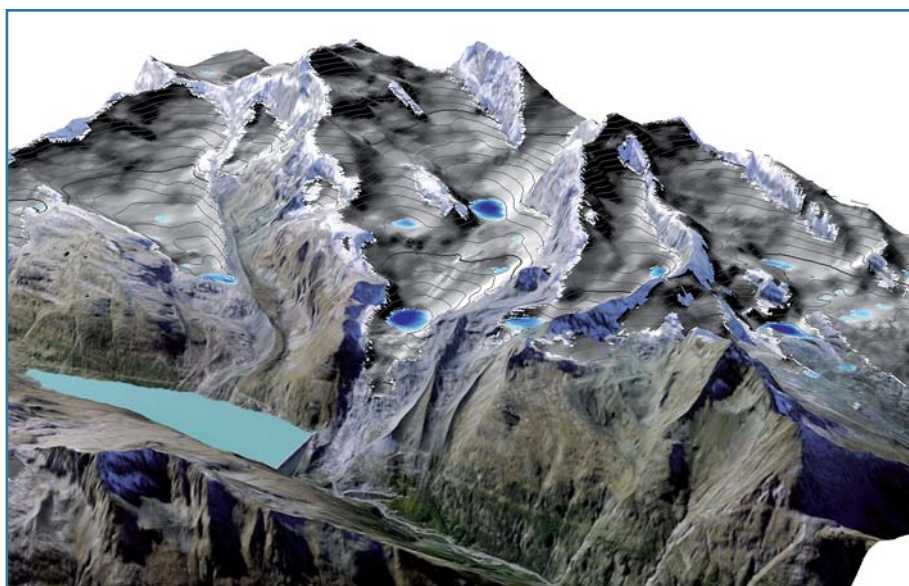


Bild 11. Die modellierten Gletscherbetten der Region Mattmark. In der Bildmitte das Bett des Allalingsgletschers mit zwei grösseren modellierten Übertiefungen (potenzielle Seen). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).

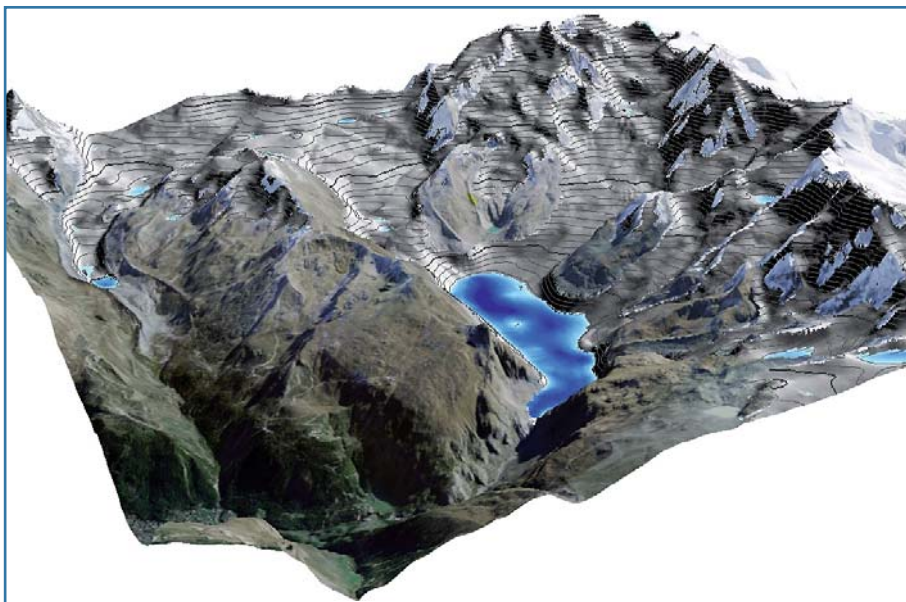


Bild 12. Die modellierten Gletscherbetten der Monte-Rosa-Region. Der potenzielle Gorner-Stausee würde sich an der Stelle der heutigen Zunge des Gornergletschers befinden, nicht weit oberhalb von Zermatt zwischen Gornergrat und Kleinem Matterhorn. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA110005).

Die Nutzung von Gletscherseen für die Wasserkraft setzt die Erteilung von wasserrechtlichen Konzessionen und einer gewässerschutzrechtlichen Bewilligung zur Wasserentnahme (Restwassermengen) voraus. Da viele bestehende Konzessionen in den kommenden Jahrzehnten ablaufen werden, stellt sich die brisante Frage, ob diese Konzessionen erneuert werden oder ob die Werke z.B. infolge Heimfalls an die Gemeinwesen übergehen werden.

Zahlreiche Gletschergebiete liegen im Schutzbereich von Landschaften von nationaler Bedeutung (BLN-Gebiete), von bundesrechtlich geschützten Auenlandschaften, Mooren, Moorlandschaften, Jagdbanngebieten. Zu erwähnen ist das UNESCO Welterbe Jungfrau – Aletsch, wo mit der Zeit grosse Seen entstehen dürften. Auch kantonale oder kommunale Schutzgebiete sind zu beachten. Solche Schutzgebiete sind möglichst ungeschmälert zu erhalten. Schutzbauten, Staudämme und Verkehrsinfrastrukturen sind dort nicht oder nur eingeschränkt realisierbar. Es ist zu bedenken, dass der Bau von Infrastrukturen später meistens Folgeerschliessungen nach sich zieht. Eingriffe im Gebirgsraum hinterlassen deutliche Spuren (Landschaftsbild, Boden, Gewässer, Fauna, Flora). Nutzung und Schutz der Gletscherseen sind jeweils sorgfältig abzuwägen, so dass schöne Hochgebirgslandschaften intakt erhalten bleiben.

6. Perspektiven

Die neuen Seen bieten ein weit offenes Feld für die Entwicklung optimaler Nutzung.

Ganz besonders gilt dies für kombinierte Projekte hinsichtlich Hochwasserschutz, Wasserkraft, Wasserversorgung und Tourismus. Die bevorstehenden Neukonzessionierungen im Bereich Wasserkraft bieten für derartige Überlegungen einen wichtigen Rahmen.

Am Rhonegletscher dürften sich im Laufe der kommenden Jahrzehnte mehrere Seen mit relativ flachen und deshalb wenig gefährdeten Seitenflanken bilden. Der unterste See wächst bereits heute hinter einem Felsriegel mit wunderschönen Gletscherschliffen. Die entsprechende Landschaft ist ein attraktiver Ausgleich für das schwindende Eis, hat aber auch wasserwirtschaftliches Potenzial. Selbst mit einer kleinen Staumauer von weniger als 20 m Höhe, welche zur Sicherung des Sees gegen Schwallwellen ohnehin nötig wäre, könnte ein Stauvolumen von 40 bis 60 Mio. m³ der Wasserkraftnutzung zugeführt werden. Die energiewirtschaftlich beste Lösung wäre, das Wasser mit einer Stufe direkt in den Räterichbodensee zu turbinieren, allenfalls kombiniert mit einem Pumpspeicherwerk. Das Wasser könnte dann in den nachfolgenden Kraftwerkstufen bis nach Innertkirchen mehrfach genutzt werden. Für einen Transfer von Wasser aus dem Rhonegebiet ins Aare- resp. Rheingebiet wären aber bedeutende rechtliche und ökologische Hindernisse zu überwinden.

Der jetzt durch einen Felsstollen regulierte See am Unteren Grindelwaldgletscher könnte sich in den kommenden Jahren nach hinten an den Fuss gewaltiger

Steiflanken mit Hängegletschern ausdehnen (Bild 9). Später werden wohl weitere Seen in grösserer Höhe und ebenfalls unterhalb grosser Steiflanken entstehen. Das Gefahrenpotenzial wird sich dadurch langfristig erhalten oder sogar steigern. Mit dem Ausbau (tiefere Niveaus) des bereits erstellten Entwässerungsstollens kann dieser Entwicklung begegnet werden.

Die grössten beiden neuen Seen mit Flächen von je etwa 2 km² könnten um die Jahrhundertmitte am Aletschgletscher entstehen (Bild 10). Diese Seen kommen in die Nähe grosser Steiflanken zu liegen. Im Auslaufbereich möglicher Flutwellen liegt eine Stadt (Brig), die Seen können deshalb nicht einfach sich selber überlassen werden. Retentionsmöglichkeiten bestehen aber bereits heute mit dem Gebidem-Stausee. Die Situation ist vor allem auch deshalb sehr speziell, weil der Aletschgletscher als grösster, in den kommenden Jahrzehnten jedoch wohl zunehmend zerfallender Alpengletscher zentraler Teil des UNESCO Welt-Naturerbes Jungfrau-Aletsch ist. Eine Vergrösserung des Gebidem-Stausees könnte allenfalls in Betracht gezogen werden, wobei die stark zunehmende Sedimentzufuhr wie heute mit regelmässigen Spülungen zu bewältigen wäre.

Die Zunge des Allalingsgletschers zieht sich aus der Steilzone zurück, aus der die Katastrophenlawine von 1965 abgegangen ist. Sie wird hinter einem Felsriegel wahrscheinlich noch in der ersten Jahrhunderthälfte eine Übertiefung mit möglicher Seebildung freigeben (Bild 11). Dieses Becken hätte ein Retentionspotenzial hinsichtlich eines Sees, der sich bei fortgesetztem Gletscherrückgang später direkt am Fuss der Steiflanken am Allalinhorn bilden könnte. Eine Nutzung mit einem Kleinkraftwerk wäre denkbar. Zudem könnte der See auch zur vermehrten Pistenbeschneigung herangezogen werden.

Seen dürften sich auch bilden, wenn die flache Zunge des Gornergletschers abschmilzt. Am heutigen Gletscherende ist ein klassisches Beispiel für einen von einer tiefen Schlucht durchschnittenen Felsriegel zu beobachten. Würde diese Situation technisch genutzt, könnte mit einer Fläche von ca. 4 km² und einem Volumen von rund 350 Mio m³ eine der grössten Stauhaltungen der Alpen entstehen (Bild 12). Entscheidend wäre dabei die Frage, wie man ein derart grosses Volumen füllt, wie ein solches Projekt in das bestehende Kraftwerksnetz einzufigen wäre und welche Funktionen hinsichtlich Hochwasserschutz und Trinkwasserver-

sorgung wahrgenommen werden könnten. Auf jeden Fall wäre ein solch grosser neuer Stausee als strategische Wasserreserve in der Schweiz für die Energienutzung willkommen, aus restlicher Sicht jedoch problematisch.

Viele Fragen sind offen, und in manchen Fällen sind sie wohl auch kontrovers zu diskutieren, so z.B. bezüglich Landschafts- und Gewässerschutz. Gerade im Hochgebirge lassen die zunehmenden Veränderungen hochkomplexer natürlicher und sozio-ökonomischer Systeme die Zeit für offenen Diskurs zu strittigen Fragen immer knapper werden. Projekte bei wachsender Unsicherheit sorgfältig abzuwägen wird deshalb immer schwieriger. Bei kumulativen Stresskombinationen nehmen zudem die Freiheitsgrade für lösungsorientierte Entscheidungen ab. Die Arbeiten im Rahmen des Projektes NELAK des NFP61 sollen frühzeitig mithelfen, solche Herausforderungen für das Phänomen der Bildung neuer Seen im Gletscherbereich der Alpen – einer absehbaren Entwicklung – zu bewältigen.

Literatur

- Bütler, M. (2006): Gletscher im Blickfeld des Rechts. Abhandlungen zum Schweizerischen Recht 725, Bern.
- Davies, M.C.R., Hamza, O. and Harris, C. (2001): The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12 (1), 134–144.
- Fischer, L., Amann, F., Moore, J.R. and Huggel, C. (2010): The 1988 Tschierwa rock avalanche (Piz Morteratsch, Switzerland): An integrated approach to periglacial rock slope stability assessment. *Engineering Geology* 116, 32–43.
- Fischer, L., Purves, S.R., Huggel, C., Noetzli, J. and Haeberli, W. (2012): On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, 241–254. doi: 10.5194/nhess-12-241-2012
- Frey, H., Haeberli, W., Linsbauer, A., Huggel, C. and Paul, F. (2010): A multi level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 339–352.
- Gruber, S. and Haeberli, W. (2007): Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112 (F2S18), 10.
- Haeberli, W. and Hoelzle, M. (1995): Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology* 21: p. 206–212. Russian translation in: *Data of Glaciological Studies*, Moscow, 82, 116–124.
- Haeberli, W. and Hohmann, R. (2008): Climate, glaciers and permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations. In: Ninth International Conference on Permafrost. Institute of Northern Engineering, University of Alaska, Fairbanks, pp. 607–612.
- Haeberli, W., Clague, J.J., Huggel, C. and Kääb, A. (2010): Hazards from lakes in high-mountain glacier and permafrost regions: Climate change effects and process interactions. In: *Avances de la Geomorfología en España, 2008–2010*, XI Reunión Nacional de Geomorfología. Solana, pp. 439–446.
- Haeberli, W., Wegmann, M. & Vonder Mühll, D. (1997): Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90 (3), 407–414.
- Haeberli, W., Paul, F. and Zemp, M. (im Druck): Vanishing glaciers in the European Alps. The Pontifical Academy of Sciences, *Scripta Varia* 118, Fate of Mountain Glaciers in the Anthropocene, Working Group 2–4 April 2011, Vatican City.
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. and Vonder Mühll, D. (2009): Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92 (3–4), 117–171.
- Huggel, C. (2009): Recent extreme slope failures in glacial environments: effects of thermal perturbation. *Quaternary Science Reviews* 28 (11–12), 1119–1130.
- Huggel, C., Haeberli, W., Kääb, A., Bieri, D. and Richardson, S. (2004): An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, pp. 1068–1083.
- Huss, M. (2011): Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research* 47 W07511, doi:10.1029/2010WR010299.
- Huss, M. (2012): Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere Discussion* 6, 1117–1156.
- Jouvet, G., Huss, M., Funk, M. and Blatter, H. (2011): Modelling the retreat of Grosser Aletsch glacier, Switzerland, in a changing climate. *Journal of Glaciology* 57 (206), 1033–1045.
- Kääb, A., Huggel, C., Barbero, S., Chiarle, M., Cordola, M., Epifani, F., Haeberli, W., Mortara, G., Semino, P. and Tamburini, A. (2004): Glacier hazards at Belvedere glacier and the Monte Rosa east face, Italian Alps: Processes and mitigation. In: Tenth International Symposium Interprevent 2004, Riva, Italy, 6–78.
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., Salzmann, N., Schlaefli, S., Schmutz, K., Schneider, D., Strozzi, T. and Weidmann, Y. (2005a): Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5 (4), 527–554.
- Kääb, A., Reynolds, J. M. and Haeberli, W. (2005b): Glacier and permafrost hazards in high mountains. In: Huber, U. M., Burgmann, H. K. H. and Reasoner, M. A. (eds.): *Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview)*. Springer, Dordrecht, 225–234.
- Künzler, M., Huggel, C., Linsbauer, A. and Haeberli, W. (2010): Emerging risks related to new lakes in deglaciating areas of the Alps. In: J.-P. Malet, T. Glade, N. Casagli (eds) *Mountain Risks: Bringing Science to Society*. Proceedings of the Mountain Risk International Conference, 24–26 November 2010, Firenze, Italy, CERG Editions, Strasbourg, France, 453–458.
- Linsbauer, A., Paul, F., Hoelzle, M., Frey, H. and Haeberli, W. (2009): The Swiss Alps without glaciers – a GIS-based modelling approach for reconstruction of glacier beds. *Proceedings of Geomorphometry 2009*. Zurich, Switzerland, 243–247.
- Müller, H., Lehmann, Th., Haeberli, W. und Bütler, M. (im Druck): Neue Gletscherseen als Folge der Entgletscherung im Alpenraum – Herausforderungen für den Tourismus. *Tourismus 2020+ interdisziplinär*, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Oerlemans, J. (2001): *Glaciers and Climate Change*. A.A. Balkema Publishers, Lisse.
- Oerlemans, J. (2005): Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science* 308, 675–677.
- Ohmura, A. (2001) Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (4), 753–761.
- Noetzli, J. and Gruber, S. (2009): Transient thermal effects in Alpine permafrost. *The Cryosphere* 3, 85–99.
- Noetzli, J., Huggel, C., Hoelzle, M. and Haeberli, W. (2006): GIS-based modelling of rock-ice avalanches from Alpine permafrost areas. *Computational Geosciences*, 10 (2), 161–178.
- Paul, F. and Linsbauer, A. (2012): Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines, and a DEM. *International Journal of Geographical Information Science*, DOI:10.1080/13658816.2011.627859
- Paul, F., Frey, H. and LeBris, R. (im Druck): A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: challenges and results. *Annals of Glaciology*.
- Paul, F., Kääb, A. & Haeberli, W. (2007): Recent

glacier changes in the Alps observed by satellite: consequences for future monitoring strategies. *Global and Planetary Change* 56 (1–2), 111–122.

Raymond, M., Wegmann, M. and Funk, M. (2003): Inventar der gefährlichen Gletscher in der Schweiz. Mitteilung Nr. 182 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Romstad, B., Harbitz, C.B. and Domaas, U. (2009): A GIS method for assessment of rock slide tsunami hazard in all Norwegian lakes and reservoirs. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2), 353–364.

Schaub, Y., Haeberli, W., Huggel, C., Künzler, M. and Bründl, M. (in press): Landslides and new lakes in deglaciating areas: a risk management framework. The Second World Landslide Forum, Rome 2011, Proceedings.

Schneider, D. (2011): On the characteristics and flow dynamics of large rapid mass movements in glacial environments. Dissertation Universität Zürich, Schriftenreihe Physische Geographie – Glaziologie und Geomorphodynamik 61.

Terrier, S., Jordan, F., Schleiss, A.J., Haeberli, W., Huggel, C. and Künzler, M. (2011): Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps. Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges – 79th Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams, Lucerne,

Switzerland (Schleiss, A. & Boes, R.M., Eds), Taylor & Francis Group, London, 497–508.

Vincent, C., Auclair, S. and LeMeur, E. (2010): Outburst flood hazard for glacier-dammed Lac de Rochemelon, France. *Journal of Glaciology* 56, 91–100.

Werder, M.A., Bauder, A., Funk, M. & Keusen, H.-R. (2010): Hazard assessment investigations in connection with the formation of a lake on the tongue of Unterer Grindelwaldgletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10 (2), 227–237.

WGMS (2008): Global Glacier Changes: Facts and Figures (Zemp, M., Roer, I., Kääb, A., Hoelzle, M., Paul, F. and Haeberli, W. eds.), UNEP, World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Switzerland.

WGMS (2011): Glacier Mass Balance Bulletin No. 11 (2008–2009). (M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, M. Hoelzle, F. Paul and W. Haeberli, Eds.), Zurich, Switzerland: ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, University of Zurich, Switzerland.

Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M. and Paul, F. (2006): Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters* 33, L13504. doi: 10.1029/2006 GL026319

Weblinks

1 http://www.nfp61.ch/D/projekte/cluster-hydrologie/seen_schmelzende_gletscher/Seiten/default.aspx

ten/default.aspx

2 <http://www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html>

3 http://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/aktuelles/Seiten/20120104_bergsturz_bondasca.aspx

4 <http://www.mn.uio.no/geo/english/research/groups/remotesensing/projects/gaphaz/>

5 <http://www.planat.ch/de/infomaterial-listen-ansicht/>

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr. Wilfried Haeberli,
Andreas Linsbauer, Matthias Künzler,
Department of Geography/University of Zurich,
Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zurich
Phone +41 (0) 44 635 51 20
wilfried.haeberli@geo.uzh.ch

Prof. Dr. Anton Schleiss

Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, LCH - ENAC - EPFL CH-1015 Lausanne
Tel. +41 21 693 23 82, anton.schleiss@epfl.ch

Dr.iur., Rechtsanwalt Michael Bütler

Postfach 860, Gloriastr. 66, CH-8044 Zürich
Tel. +41 (0)43 477 99 66
michael.buetler@bergrecht.ch
www.bergrecht.ch

terra
vermessungen

Unsere Referenz – Rundum zufriedene Kunden

terra vermessungen ag
Tel.: 043 500 10 77
terra@terra.ch
www.terra.ch

HYDROGRAPHIE | STRÖMUNGSMESSUNG | SEEGRUNDKARTIERUNG